

Artículo/Article
Sección C/Section C
Vol. 15, nro. 2
e3130

Diseño de un sistema de detección de Gamma Ray Bursts para la Colaboración LAGO

Dennis Cazar-Ramirez[1,4]*, **Mario Audelo**[2,4], **Diego Castillo**[3], **María Fernanda Heredia**[2,4], **Edwin Pozo**[2]

[1]Laboratorio de Detección de Partículas, Astropartículas y Radiación Leopard, Universidad San Francisco de Quito USFQ, Quito-Ecuador

[2]Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo ESPOCH, Riobamba-Ecuador

[3]Escuela de Física, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga-Colombia

[4]Para la Colaboración LAGO. La lista completa de autores se encuentra en http: //lagoproject.net/about/collaboration.html

*Autor para correspondencia/Corresponding author: dcazar@usfq.edu.ec

Design of a Gamma Ray Burst Detection System for the LAGO Collaboration

Abstract

The LAGO (Latin American Giant Observatory) Collaboration aims to detect high-energy photons from Gamma Ray Bursts using water Cherenkov detectors. To achieve the sensitivity needed for data collection, WCDs must have a high detection efficiency which is improvedinstalling them at sites above 4000 m.a.s.l. This article outlines the development of an autonomous detector designed for deployment on the slopes of the Chimborazo volcano (4310 m.a.s.l.) from the mechanics of the tank, its data acquisition and data storage system, electric power generation and backup systems to guarantee continuous operation over time; it is estimated that the detector will be able to operate for a maximum period of 18 months without maintenance, the water purification treatment increases transparency by 1.15 times, as a consequence the number of photoelectrons increasing by a factor of 2 compared to alternative implementations. The photovoltaic system used ensures continuos operation for at least 5.9 years.

Keywords: Gamma Ray Bursts, Water Cherenkov Detector, Astroparticles

Resumen

La Colaboración LAGO (Latin American Giant Observatory) tiene como objetivo la detección de fotones de alta energía provenientes de destellos de rayos gamma utilizando Detectores Cherenkov de agua. Para alcanzar la sensibilidad necesaria para la recolección de datos estos detectores deben poseer una alta eficiencia de detección, la cual mejora instalado el detector en sitios de altura mayor a 4000 msnm. En este trabajo se describe la implementación de un detector autónomo para su instalación en las faldas del volcán Chimborazo (4310 msnm) desde la mecánica del tanque, su sistema de adquisición y transferencia de datos, generación de energía eléctrica y sistemas de respaldo para poder garantizar el funcionamiento continuo en el tiempo; se estima que el WCD podrá funcionar por un período máximo de 18 meses sin mantenimiento, el tratamiento de purificación del agua aumenta la transparencia





Editado por / Edited by: Eva O.L. Lantsoght

Recibido / Received: 26/10/2023

Aceptado / Accepted: 28/11/2023

Publicado en línea / Published online: 12/12/2023

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v15i2.3130




en 1,15 veces lo que a su vez incrementa el número de fotoelectrones en un factor 2 comparado con otras implementaciones. El panel fotovoltaico usado asegura una operación continua de al menos 5,9 años.

Palabras clave: estallidos de rayos gamma, detector Cherenkov de agua, astropartículas

INTRODUCCIÓN

Los estallidos de rayos gamma (GRBs, por sus siglas en inglés) son eventos astronómicos extremadamente energéticos y de corta duración que emiten una gran cantidad de radiación en forma de rayos gamma. Típicamente la duración de un GRB puede ir desde 0,1 a 100 s y abarcar un intervalo de energía entre 10^{51} y 10^{55} ergs [1]. Los GRBs son los eventos más energéticos conocidos en el universo, su estudio proporciona información valiosa sobre los procesos físicos en condiciones extremas, como la formación de agujeros negros, la fusión de estrellas de neutrones y la liberación de energía en eventos cósmicos catastróficos.

Determinar el origen de los GRBs ha sido objeto de investigación durante décadas, actualmente se cree que hay dos clases principales de GRBs; los primeros son los producidos durante el colapso de un núcleo estelar (o colapso de supernova), estos GRBs se asocian con el colapso de núcleos estelares masivos y se cree que se producen cuando una estrella masiva, con una masa al menos unas 20 veces mayor que la del sol, agota su combustible nuclear y colapsa bajo la influencia de la gravedad [2]. Esto da lugar a la formación de un agujero negro o una estrella de neutrones en el centro de la estrella colapsada, durante este proceso, se libera una inmensa cantidad de energía en forma de un chorro de partículas de alta energía que produce el GRB.

Otro tipo de GRBs se cree que se originan a partir de la fusión de dos estrellas de neutrones, que son objetos extremadamente densos y altamente magnetizados que se forman a partir del colapso de núcleos estelares masivos. Cuando dos estrellas de neutrones están en órbita, una alrededor de la otra, se acercan lo suficiente y pueden fusionarse liberando una gran cantidad de energía en forma de un GRB. La detección y estudio de los GRBs son fundamentales para comprender los procesos astrofísicos involucrados.

Los GRBs pueden ser detectados con instrumentos montados sobre satélites, por ejemplo, Fermi-LAT (Fermi Gamma Ray Space Telescope) que fue uno de los primeros en identificar GRBs y proporcionar información sobre su distribución en el cielo [3].

Cuando los GRBs alcanzan la atmósfera, interactúan con los átomos y moléculas presentes en ella creando una cascada de partículas subatómicas y núcleos ionizados que se propaga hasta llegar al suelo, este fenómeno se conoce como Lluvias Aéreas Extendidas (EAS por sus siglas en inglés). Las EAS producidas por la llegada de un GRB producen un aumento significativo en el flujo de partículas subatómicas que llegan a la Tierra.

Un detector adecuadamente calibrado podrá detectar un aumento abrupto del conteo de partículas en un breve instante de tiempo. Esta técnica conocida como *Single Particle*

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v15i2.3130



Technique (SPT por sus siglas en inglés) [4] ha sido usada en experimentos basados en arreglos de detectores a gran altura como ARGO [5] y el Observatorio Pierre Auger [6].

La colaboración LAGO a través del proyecto LAGO [7] está implementando una red de detectores WCD a diferentes altitudes y latitudes en toda América Latina (véase figura 1). Uno de los objetivos principales de LAGO es la detección de eventos extremos [8] como los GRBs; gracias a su amplio campo de visión (FOV) el proyecto LAGO se constituye como un excelente sistema para detectar GRBs y monitorear fuentes estables de fotones de alta energía [9], por ejemplo las *Pulsar Wind Nebulae* (PWN).



Figura 1. Distribución geográfica de los detectores WCD del Proyecto LAGO, el observatorio cubre un rango de 5000 metros en altitud y 86º de latitud

En el presente artículo se describen las fases de diseño y construcción de un detector WCD especializado para la detección de GRBs que se está instalando en las cercanías del volcán Chimborazo en Ecuador. En la sección métodos se describen los principios de diseño del sistema, los componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos utilizados, así como la campaña de simulaciones realizadas para determinar el flujo de partículas esperado en respuesta a un GRB. En la sección resultados y discusión se describe el estado actual del tanque y los resultados de las pruebas iniciales.

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v15i2.3130



MÉTODOS

En esta sección se describen todos los elementos que componen el detector WCD y se hace énfasis en los criterios de diseño de estos elementos tomando en cuenta que la construcción de un detector WCD implica considerar varios aspectos para asegurar su eficiencia y precisión. Los criterios clave considerados para este proyecto son:

- Medio de detección: este debe ser transparente en el rango espectral de interés, en este caso el azul visible y el ultravioleta cercano (350 – 500*nm*) y mantener esta característica constante en el tiempo.

- Material del tanque: el tanque debe aislar de la luz externa al agua que contiene y la reflectividad interna de sus paredes debe ser muy alta para así maximizar la recolección de la luz Cherenkov.

- Eficiencia de detección: la geometría del tanque y la configuración del tubo fotomultiplicador (PMT) deben optimizarse para garantizar una eficiencia de detección adecuada para los fotones Cherenkov.

- Sistema de adquisición de datos: un sistema de adquisición de datos eficiente y confiable es esencial, debe ser capaz de manejar el flujo de datos y proporcionar información adicional para el análisis.

- Calibración: se deben implementar sistemas de calibración para garantizar la precisión de la medición, es un proceso iterativo que involucra simulaciones computacionales y análisis de datos para determinar los parámetros óptimos del sistema.

- Supresión de fondo: estrategias para reducir la contribución del fondo deben ser consideradas y aplicadas para mejorar la sensibilidad del detector. Esto podría incluir técnicas de veto o discriminación de eventos no deseados, instalación de detectores centelladores o de gas que actúen como discriminador para la adquisición de datos.

- Estabilidad y fiabilidad: el detector debe ser robusto y estable en diversas condiciones ambientales y debe ser capaz de funcionar de manera confiable durante largos períodos de tiempo para minimizar la necesidad de mantenimiento y reparación.

Diseño del detector WCD

La figura 2 muestra los elementos fundamentales del detector WCD diseñado en este proyecto. Se pueden diferenciar tres elementos: el sistema de detección formado por el tanque de agua, el tubo fotomultiplicador (PMT) y la tarjeta base del PMT; el sistema de adquisición de datos (DAQ) formado por la tarjeta de interfase LAGO, la tarjeta DAQ más los sensores ambientales; el sistema de control y almacenamiento de datos formada por una *Single Board Computer* (SBC), disco de almacenamiento externo y módulo GPRS y el sistema de generación y distribución de voltajes formado por panel fotovoltaico, controlador de carga, batería y tarjeta electrónica para la distribución de voltajes.

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v15i2.3130



Los parámetros de diseño y construcción de cada bloque del sistema se describen a continuación.

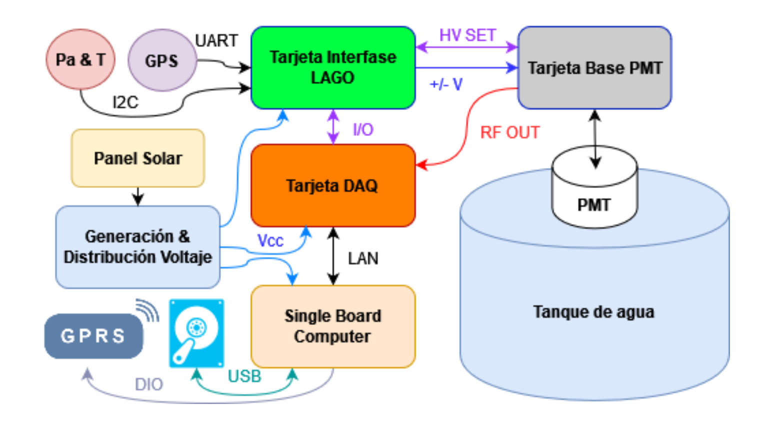


Figura 2. Diagrama a bloques donde se muestran los componentes del detector WCD autónomo con las principales interconexiones entre los bloques

Tanque de agua

La geometría, el material y el revestimiento interno del tanque son algunos de los parámetros que determinan cuantos fotones de luz Cherenkov (o fotoelectrones) pueden llegar al fotomultiplicador.

El número de fotoelectrones que se producen en el tanque se calcula con la siguiente ecuación [10]:

instalado en un lugar de difícil acceso, condiciones climáticas severas y ausencia de suministro de energía eléctrica.

$$N_{fe} = N_{fot/cm} \times H \times QE \times \left(\frac{A_P}{A_T}\right) \times r \times t \tag{1}$$

Donde:

$N_{fot/cm}$ = número de fotones Cherenkov producidos por cm.
H = altura del agua en cm.
QE = eficiencia cuántica del PMT.
A_P/A_W = relación entre el área de detección del PMT y el área de detección del tanque.
r = coeficiente de reflexión del revestimiento interno
t = coeficiente de transmisión del agua.

Generalmente, en la construcción de WCDs del proyecto LAGO se han utilizado tanques de agua comerciales [11]. Si bien esto es una ventaja, puesto que se pueden

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v15i2.3130



conseguir localmente y son de relativamente bajo costo, estos tanques presentan dos inconvenientes: usualmente el espesor del material con el que están hechos y su densidad óptica son insuficientes para evitar el paso de la luz a través de ellos. Eso implica la necesidad de aislarlos del entorno con alguna cobertura opaca (completamente opaca al menos en el rango del visible). Asimismo, estos tanques son generalmente de materiales sintéticos, como el polietileno lineal, que suelen presentar muy poca adherencia a pinturas y películas comerciales usadas para el revestimiento interno.

Para este proyecto se han diseñado y construido dos tanques de 1100 litros de capacidad cuyas características se detallan en la tabla 1.

Tabla 1. Descripción de los materiales y características geométricas del tanque de agua usada para el diseño del WCD

Características del Tanque de agua	
Dimensiones (cm)	
altura (*a*)	100
diámetro (*d*)	142
altura del agua (*H*)	71
Materiales	
tanque	Acero inox. 304
espesor revestimiento interno	2 mm pintura epóxica
coeficiente de reflexión	0,79

Los tanques son de geometría cilíndrica y una relación de 2 a 1 entre el diámetro y su altura, lo que maximiza el área de detección (ver figura 3). El acero 304 tiene una excelente resistencia a la corrosión y, ya que es usado para conservación de alimento, garantiza que el agua no sufra deterioro por crecimiento de microorganismos. El espesor del acero garantiza que el tanque sea opaco a la luz del exterior por lo que no se necesita ningún revestimiento externo.

Para la detección de la radiación Cherenkov es necesario que la parte interna del tanque tenga un alto porcentaje de difusión y reflectividad, por lo cual se ha cubierto usando láminas de Tyvek o lona de acrílico, cuya reflectividad es casi ideal: 0,97 para el Tyvek [12]. Esta solución no puede ser usada en la presente implementación ya que el Tyvek no se adhiere al acero inoxidable.

Se utilizará en cambio una capa de pintura epóxica blanca (usada para señales de tránsito) cuyo coeficiente de reflexión fluctúa entre 0,75 y 0,85 [13]. Aunque la reflectividad es más baja que el Tyvek la pintura se adhiere al acero inoxidable.



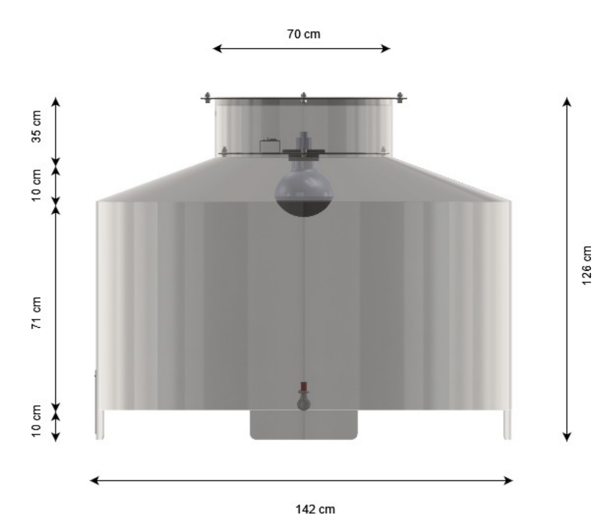


Figura 3. Diseño del tanque para el WCD, la superficie fotosensible del PMT está sumergida en el agua y todos los componentes electrónicos se instalan en un compartimiento aislado para evitar la corrosión por condensación de agua y facilitar el acceso para mantenimiento.

Tratamiento del agua

Por consideraciones logísticas y de costos, el agua usada para los tanques proviene de la red pública a la cual se aplica un tratamiento de purificación de modo que cumpla con las siguientes condiciones:

- Pureza: el agua debe estar libre de impurezas y microorganismos para evitar la producción de materia orgánica (algas, hongos) que afecten a la transparencia del agua. La pureza se determina mediante la medida de la resistividad del agua [14].

- Transparencia: la absorbancia A_λ del agua en el rango de luz visible y ultravioleta cercano ($\approx 400 nm$) debe ser la menor posible, sabiendo que se parte de una absorbancia igual a $0{,}055 m^{-1}$ para el agua potable sin tratamiento [15].

- Estabilidad: el agua debe mantener su pureza y transparencia por largos periodos de tiempo (idealmente años).

Para cumplir con estas condiciones, el agua será filtrada usando filtros comerciales que garantizan la eliminación del 99 % de partículas iguales o mayores a 50 micras (arena, tierra y pequeños sedimentos) para luego pasar por un proceso de purificación por choque usando peróxido de hidrógeno (agua oxigenada al 50 % de concentración) en una proporción de $10 mg/L$.

Para determinar el deterioro de las características del agua se analizarán dos muestras de agua: agua filtrada y purificada al momento de llenar el tanque y agua filtrada y purificada después de un año en el WCD. Para cada muestra se medirá la absorbancia en el rango 350 – 550 nm y la conductividad.

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v15i2.3130



Electrónica de Adquisición

La colaboración LAGO ha desarrollado una electrónica propia para los tanques WCD la cual se compone de una tarjeta base donde se conecta el PMT, una placa SoC (*System on chip* por sus siglas en inglés) modelo STEMLAB 125-14 para la adquisición de datos y una tarjeta de interfase para la interconexión de todos los componentes [16]. Para la comunicación y almacenamiento de datos se usará una SBC (*Single Board Computer* por sus siglas en inglés) modelo Raspberry Pi 4. La electrónica implementa las siguientes funciones:

- Alimentación del sistema: la tarjeta de interfase genera y distribuye todos los voltajes requeridos, los cuales se detallan en la tabla 2, las pruebas de consumo fueron realizadas usando cargas de 100 Ω.

Tabla 2. Voltajes generados por la tarjeta de interfase con sus respectivos consumos máximos. en total la tarjeta necesita 5,92 W de potencia. La alimentación para las tarjetas SoC y SBC son generados por la tarjeta de generación y distribución de voltajes (ver figura 2)

Elemento	V(v)	I_{max}(mA)
Tarjeta	± 3.3	50
Base	+5	50
PMT	+12	465
SoC	+5	2500
SBC	+5	2000

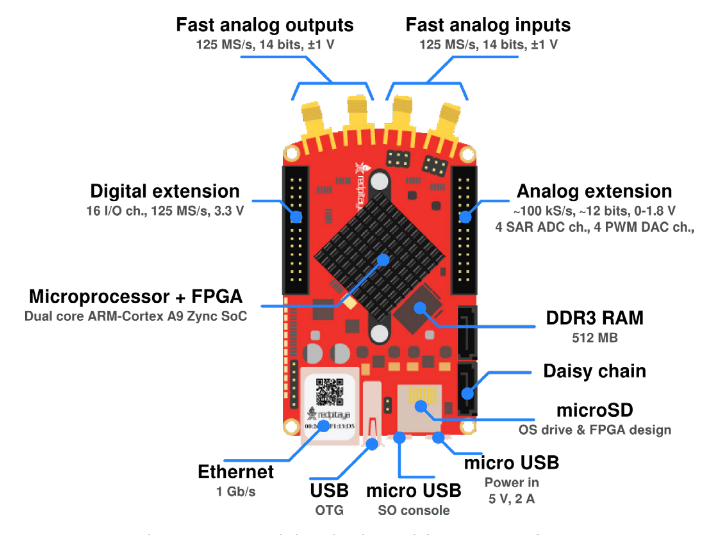


Figura 4. La tarjeta SoC (STEM LAB 125-14) digitaliza la señal de ingreso a 14bits y 125MSPS, esta tarjeta se conecta a la tarjeta de interfase mediante los conectores de extensión

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v15i2.3130



- Adquisición de datos: los pulsos que provienen del PMT son digitalizados, procesados y almacenados en un archivo de texto para su posterior análisis. Para estas tareas, se usa una tarjeta SoC que monta un sistema operativo Linux Debian 10 en su microprocesador para ejecutar el *software* de configuración del detector y el *firmware* de adquisición y procesamiento de datos en su FPGA [16].

- Alimentación del PMT: el PMT provee la primera amplificación de la señal del WCD. El nivel de amplificación se determina mediante una fuente de alto voltaje (HV) que se controla con una salida PWM y el valor de HV es constantemente monitoreado y corregido para mantener constante el nivel de amplificación.

- Configuración del sistema DAQ: la SoC es configurada a través de la SBC mediante una conexión LAN a 100*Mbps*, se fijan los parámetros de funcionamiento (valor de HV, nivel de discriminación) y se implementa el sistema de transferencia de datos y almacenamiento.

Almacenamiento de datos y comunicación

Para instalar el WCD en lugares de difícil acceso, como es el caso de este proyecto, se van a implementar los siguientes sistemas adicionales:

- Almacenamiento de datos: el sistema DAQ genera un archivo de datos cada hora el cual es almacenado en un disco externo de alta capacidad, para esto se usa una SBC.

- Disco externo: un disco externo de estado sólido (SSD) de alta capacidad (1TB) se conectará a la SBC para almacenar los archivos de datos generados por el WCD.

- Módulo GPRS: un módulo GPRS (tipo SIM900A) será conectado a la SBC para implementar un sistema de envío de mensajes de texto SMS automáticos; en este mensaje se detalla el estado del detector (configuración actual, valores de presión y temperatura) y el porcentaje de ocupación del disco externo, de este modo se puede intervenir en el detector en caso de necesidad.

Sistema de generación eléctrica

El sistema de generación de energía se compone de un panel fotovoltaico que carga una batería de 170*W* a través de un controlador de carga. Las características del sistema de energía solar se detallan a en la tabla 3.

Tabla 3. Características del sistema de alimentación fotovoltaica para el WCD

Elemento	Tipo	Valores
Panel fotovoltaico	Policristalino	170W 12V
Batería	Gel	12V 100Ah
Controlador de carga	PWM charging	12V 10A

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v15i2.3130





Para estimar la potencia generada por el panel fotovoltaico se empieza realizando una simulación en condiciones ideales (usando las herramientas desarrolladas en [17]) y se compara con los datos del fabricante (ver figura 5).

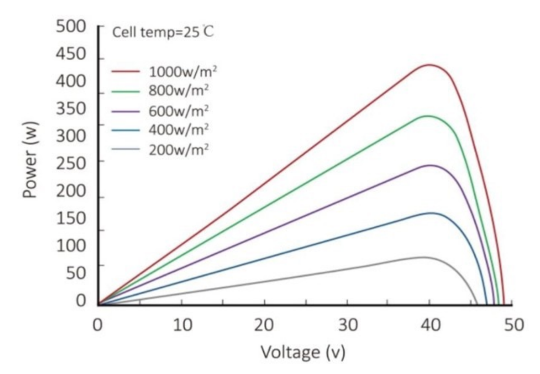


Figura 5. Curva Potencia-Voltaje ideal generada por el panel fotovoltaico, según datos del fabricante, para diferentes valores de irradiancia solar [18]

Después se realiza la simulación en condiciones reales para determinar el valor esperado de potencia generada. Habrá que tomar en cuenta una disminución de aproximadamente el 10 % debido a pérdidas en el cableado y el estado del panel.

Como medida de seguridad se ha desarrollado una tarjeta electrónica para la distribución voltajes y limitación de potencia de modo que cada elemento del sistema reciba la alimentación con el rango de corriente adecuada (ver tabla 2).

El diseño está basado en módulos comerciales para disminuir el costo, el tiempo de producción y aumentar la reproducibilidad de la tarjeta. El diseño de la tarjeta será liberado como *hardware* libre bajo licencia GPL versión 3.

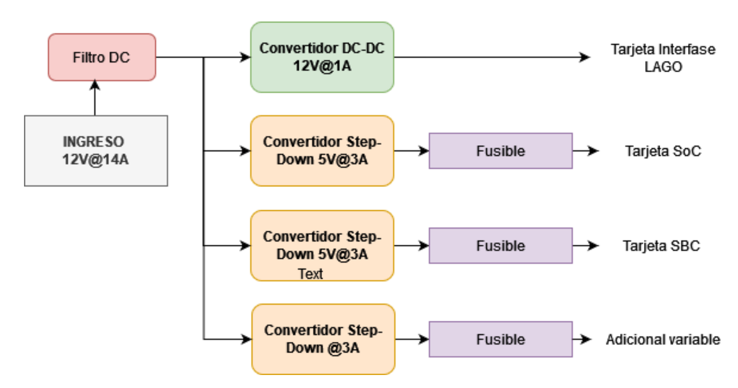


Figura 6. Esquema a bloques de la tarjeta de distribución y generación de voltajes diseñada para este proyecto, se ha añadido una salida adicional de voltaje variable entre 1,5 y 9 V para futuros usos.

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v15i2.3130



Ubicación del detector

Se instalarán dos detectores WCD que trabajarán en modo de coincidencia a una distancia de 10 m el uno del otro, en la estación meteorológica de la ESPOCH, ubicada en el volcán Chimborazo a 4310 msnm en las coordenadas 1º32'03" S, 78º52'4"O. La estación se encuentra a 50 km de la ciudad de Riobamba; en este lugar no hay acceso a energía eléctrica ni a una red de transmisión de datos de alta capacidad (sólo servicio GPRS). La figura 7 muestra una imagen del lugar descrito.

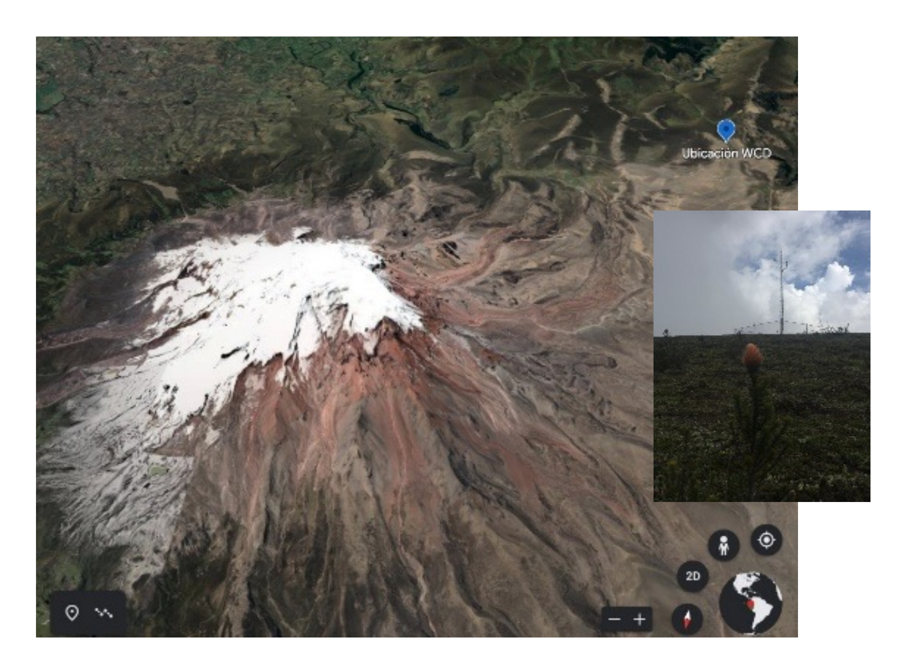


Figura 7. Imagen satelital del lugar de instalación de los detectores WCD en el nevado Chimborazo (pin azul), los cuales estarán dentro de la estación meteorológica de la ESPOCH (recuadro en la imagen)

Se analizarán los datos de la estación meteorológica instalada en el lugar para determinar el promedio de temperatura e irradiancia solar necesarios para estimar el rendimiento del panel fotovoltaico y la presión atmosférica para realizar correcciones en el flujo de partículas registradas por el detector.

Simulaciones computacionales

Para el desarrollo de una simulación que permita conocer el funcionamiento de los WCD en la reserva Chimborazo debemos tomar en cuenta los aspectos y características principales de la señal emitida por los GRBs y la radiación de fondo del lugar donde se alojará el observatorio de rayos cósmicos. Se utilizará Geant4, un kit de herramientas de código abierto que crea simulaciones del paso de partículas o radiación a través de la materia [19]. Las aplicaciones construidas más destacadas en Geant4 pueden simular cualquier detector y fuente de radiación, además de grabar salida elegida de cantidades

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v15i2.3130



físicas debido a partículas fuente y secundarias. Con estas herramientas la colaboración LAGO ha desarrollado el ambiente de simulación ARTI [20] y los resultados de estas simulaciones serán usados para obtener una respuesta teórica del WCD que será usada para la calibración del tanque una vez instalado.

De esta manera podemos simular el trabajo de un arreglo de *n* detectores virtuales operando simultáneamente. En este caso las partículas secundarias resultantes que alcanzan el suelo se filtran en un WCD virtual con un diámetro $\phi = 1{,}42\ m$ y un alto de $h = 0{,}71\ m$, tal y como se especifica en el diseño mecánico del tanque. También, Geant4 nos permite establecer las propiedades ópticas del agua y del recubrimiento, además de facilitar la recolección de datos simulados por los fotones Cherenkov resultantes debido a que pueden ser contabilizados según su longitud de onda y la correspondiente eficiencia cuántica del PMT.

Tomando en cuenta condiciones similares, [8] se realizaron simulaciones de fondo y señal en cinco diferentes lugares, incluido el Chimborazo, haciendo uso de los esquemas ARTI y OneDataSim, obteniendo además un amplio FOV al tener todos los detectores midiendo simultáneamente. Es así como la radiación de fondo esperada fue previamente protocolada con ARTI, tomando en cuenta el perfil atmosférico estándar y las condiciones geomagnéticas en el Chimborazo. Las señales de las fuentes de rayos gamma se modelaron con 10^5 fotones inyectados en la parte superior de la atmósfera local para diferentes ángulos cenitales ($0^o \leq \theta \leq 15^o$), con el fin de evitar fluctuaciones estadísticas.

Además, el flujo secundario resultante debe ser normalizado usando como referencia GRBs previamente estudiados, como el GRB190114C de la colaboración MAGIC [21], el GRB 180720B de la colaboración HESS [22] y el GRB 221009 A de la colaboración LHASSO [23], para tener en cuenta el impacto apropiado de la radiación secundaria producida por el GBR modelado en la radiación de fondo de la reserva Chimborazo. Esto es estrictamente necesario debido a que los WCD deben estar continuamente monitoreando la evolución temporal del flujo de partículas secundarias del fondo, para así asegurar que la observación de señales de GRB sea fácilmente distinguida y medida por el detector a cualquier tiempo.

Análisis preliminares de la respuesta del WCDs

El sistema DAQ fue probado usando el WCD "Panchito" ubicado en la Universidad San Francisco de Quito USFQ, a 2300 msnm. Las características del detector se detallan en la tabla 4.

Tabla 4. Principales características del WCD Panchito usado para las pruebas preliminares del sistema DAQ para los detectores del proyecto

Características WCD "Panchito"	
Material	**Polietileno de alta densidad**
Diámetro PMT	8 "
Área del tanque	8,24 m^2
Altura del agua	100 cm
Coeficiente de reflexión	0.87
Coeficiente de transmisión	0,97 @ 400 nm

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v15i2.3130



RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presentan los resultados de las primeras pruebas del sistema y se las compara con simulaciones y datos de otros detectores para determinar los parámetros de calibración inicial del WCD.

Condiciones atmosféricas

Se han analizado los datos de la estación meteorológica de la ESPOCH (figura 8) para determinar la temperatura promedio y la presión atmosférica, encontrando un promedio anual de 3,74 °C, una temperatura máxima de 4,60 °C y una mínima de 3,21 °C. En estas condiciones el agua del tanque no va a congelarse por lo que no es necesario instalar ningún revestimiento externo.

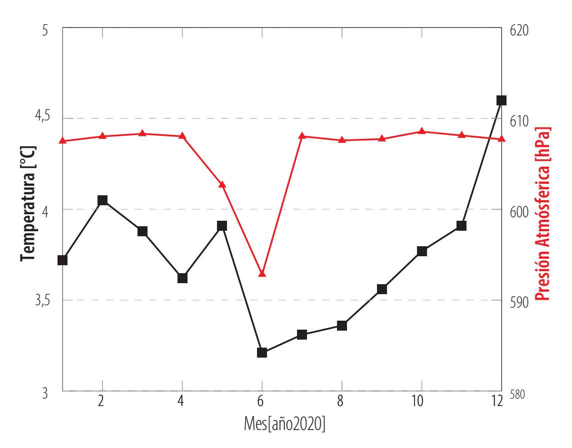


Figura 8. Promedio Mensual de temperatura y presión en el lugar de instalación del WCD.

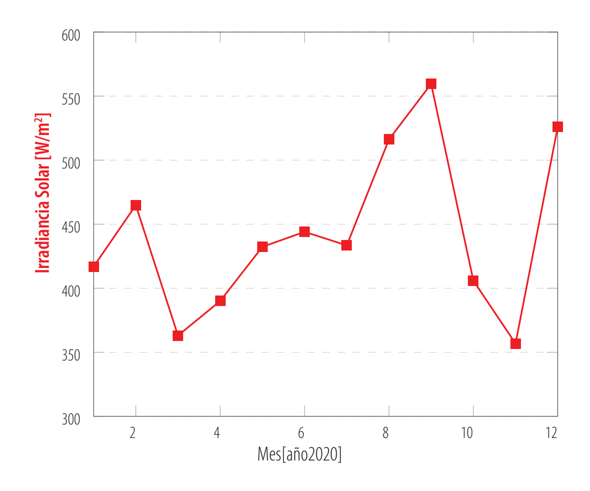


Figura 9. Promedio Mensual de la Irradiancia Solar, tomando en cuenta que el panel solar tiene un área de $0{,}9 m^2$ se depositan sobre el 391*W* de potencia promedio

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v15i2.3130



Rendimiento del panel fotovoltaico

La irradiancia solar promedio es de 442,49W/m^2 (figura 9). Este dato junto con la temperatura promedio permitirá estimar el rendimiento del panel fotovoltaico.

Se inicia realizando una simulación en condiciones ideales para determinar el error. Se obtuvo un máximo de para 163,5W que corresponde a un error relativo de 3,8 % (ver figura 10).

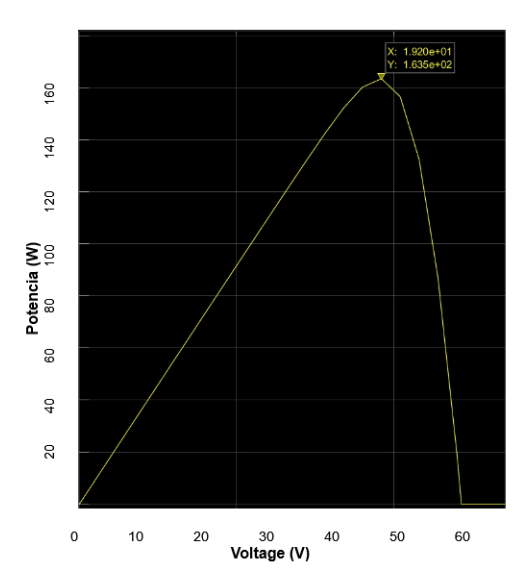


Figura 10. Curva Potencia-Voltaje ideal generada por el software de simulación, los resultados son consistentes con los datos del manual del fabricante [18]

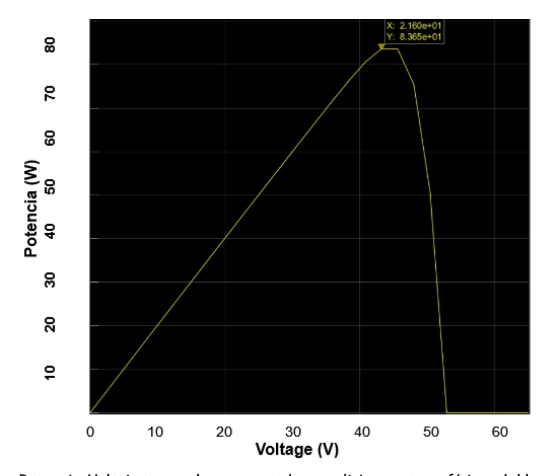


Figura 11. Curva Potencia-Voltaje tomando en cuenta las condiciones atmosféricas del lugar de instalación

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v15i2.3130




Luego se realiza la simulación en condiciones reales de irradiancia y temperatura, tomando en cuenta el error relativo determinado anteriormente obtenemos (86 ± 3) W (figura 11).

En condiciones reales se debe considerar una pérdida promedio del 10 % debido a variables de instalación (cableado, contactos, limpieza de la superficie del panel). Así, se obtienen 77 W equivalente a $12V@6A$ por lo que el tiempo de carga total (para un ciclo de carga completo) será de 15,6 horas.

Tomando en cuenta la capacidad de la batería $100Ah$ y el consumo máximo del detector de $5A$ se obtiene un tiempo de descarga promedio de 20 horas que concuerda con el valor nominal declarado con el fabricante [18].

La vida útil de la batería considerando un porcentaje de profundidad de descarga del 30 % se estima en 2600 ciclos de carga que equivalen a 5,9 años.

Análisis fisicoquímicos del agua

Se ha analizado una muestra de agua del tanque "Panchito" después de un año de permanencia en el mismo (muestra 2) y se la ha comparado con una muestra del agua tomada al momento de llenar el tanque (muestra 1), para determinar la variación de la absorbancia en el intervalo 350 – 550 nm y la conductancia obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 5. Transmitancia y Conductancia de dos muestras de agua tratadas con peróxido de hidrógeno, la muestra 2 ha estado 1 año en el tanque del WCD

Muestra	Transmitancia		Conductividad [µS/cm]
	350 nm	550 nm	
Original	0.859	0.972	112.7
1 año	0.990	0.998	117.7

Con estos resultados se obtiene una transmitancia promedio de 0,996 a 400 nm. En la figura 12 se puede apreciar como el tratamiento con peróxido de hidrógeno mejora la transmitancia del agua en la región 350– 400 nm en un 15 %.

La resistividad del agua después de un año es $84{,}9k\Omega \cdot m$. que, comparada con la muestra original, refleja un aumento del 4,4 %, valor que está muy lejos de los $10M\Omega \cdot m$ que se reporta para garantizar una vida útil del agua de 20 años [14].

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v15i2.3130



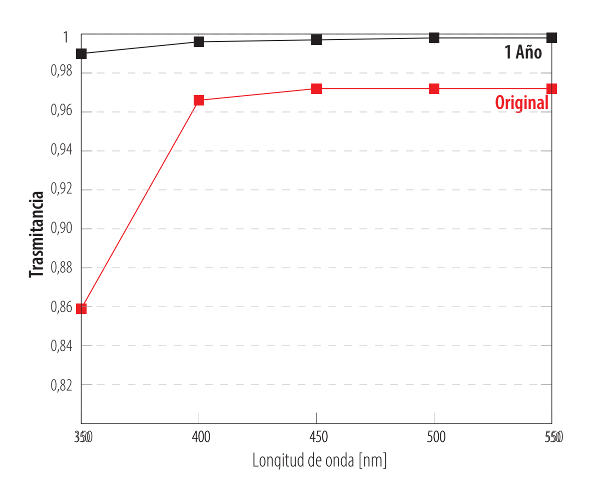


Figura 12. Transmitancia promedio de dos muestras de agua del tanque tomadas al momento de llenar el tanque (Original) y luego de un año (1 Año), se puede apreciar el aumento de la transmitancia en toda la región de interés

Análisis de datos preliminares

Se calcula el número de fotoelectrones que se producen en el tanque usando la ecuación 1 y los siguientes datos:

- $N_{fot/cm} = 320$ [14]
- $H = 71$ cm
- $QE = 25\,\%$
- $A_P = 380\ cm^2$ [24]
- $A_T = 1{,}58\ m^2$
- $r = 0{,}79$ a $400nm$
- $t = 0{,}99$ a $400nm$

Resulta un valor de $N_{fe} = 106{,}8$ lo que duplica la cantidad de fotoelectrones en comparación con los cálculos hechos para un WCD de similar geometría [10].

La figura 13 nos muestra el flujo total de partículas esperado en Quito [20], escalándolo al área del tanque A_T se calcula la tasa de flujo en el WCD que es igual 1,58KHz.

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v15i2.3130



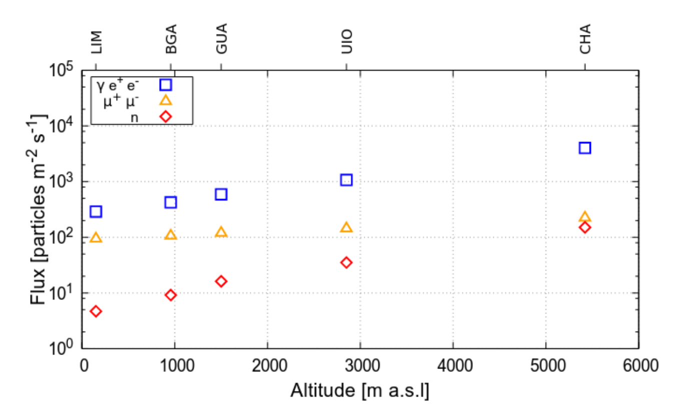


Figura 13. El número de partículas totales (fotones, muones y electrones) esperado en un área de 1 m² por segundo a diferentes alturas, esta información nos permite estimar el flujo esperado en el lugar de instalación del detector WCD, imagen tomada de [20]

Con esta tasa de flujo se estima que se creará un archivo de datos de 80 MB por hora y, tomando en cuenta una capacidad de almacenamiento de 1 TB, se calcula que el detector puede almacenar datos por un máximo de 18 meses luego de los cuales será necesario descargar los datos en el repositorio de LAGO para vaciar el disco.

Se ha procesado un archivo de 1 hora de datos configurando el detector con $HV = 1350V$ para obtener una amplificación inicial de $\approx 0{,}5 \times 10^7$ y *trigger* de 50 ADCs equivalente 6 mV de amplitud de pico.

La figura 14 muestra amplitud promedio del pulso generado por el PMT, 60 mV para el canal 1, que indica que se está usando el 60 % del rango de ingreso del ADC. La duración media del pico es de 150 ns.

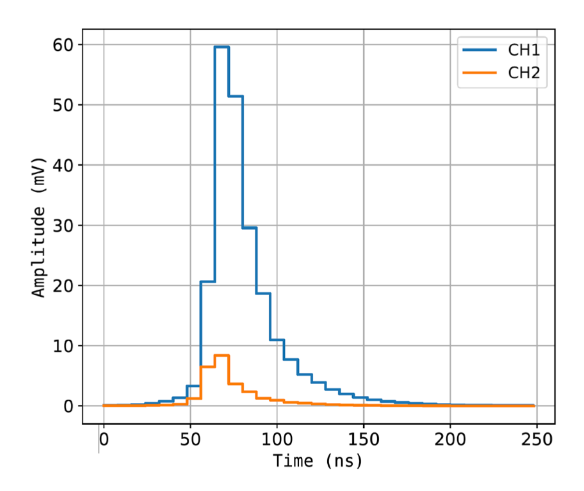


Figura 14. Forma del pulso de salida del PMT promediado en una hora de adquisición para los dos canales de salida del PMT

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v15i2.3130



En el histograma de carga se pueden identificar los tipos de partículas que el WCD está detectando. En la figura 15, el canal 1 muestra un claro pico que corresponde a los electrones mientras que el pico muónico se manifiesta menos claramente. El canal 2 registra solo la componente electrónica.

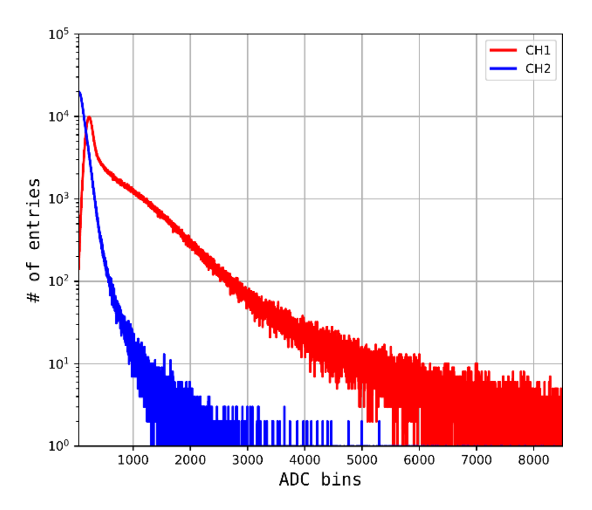


Figura 15. Histograma de carga promediado en una hora de adquisición para los dos canales de salida del PMT.

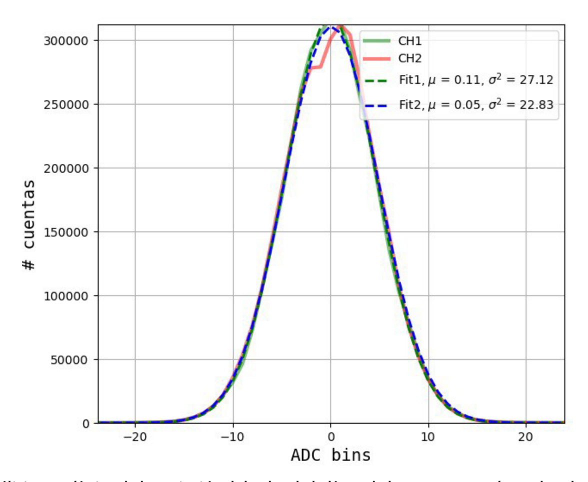


Figura 16. Análisis estadístico de la variación del valor de la línea de base para una hora de adquisición para los dos canales de salida del PMT

Es importante analizar la línea de base, es decir el valor de ADCs cuando no existe señal. Este valor es necesario para implementar un sistema dinámico de corrección de datos.

El valor promedio obtenido (ver figura 16) es menor de una cuenta de ADC equivalente a $12 \mu V$.

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v15i2.3130



Los análisis presentados en esta sección fueron realizados usando scripts desarrollados por la Colaboración LAGO, el código fuente y los archivos de datos utilizados se pueden encontrar en [25].

CONCLUSIONES

El presente trabajo describe el diseño y construcción de un arreglo de 2 WCDs para ser instalados en la estación meteorológica de la ESPOCH a 4330 msnm como parte de la implementación de un observatorio de rayos cósmicos de altura.

El prototipo descrito se basa en la arquitectura del detector WCD estándar de la Colaboración LAGO con varias modificaciones para incorporar un tanque resistente a climas extremos, alimentación con energía solar, almacenamiento de datos de alta capacidad y comunicación mediante SMS.

El análisis de las muestras de agua del WCD después de un año en el tanque muestran que la absorbancia es menor que al momento de llenarlo, esto se debe al efecto oxidante del peróxido de hidrógeno que ha sedimentado todas las impurezas del medio. Estos depósitos en el fondo del tanque no atenúan la radiación Cherenkov y, este efecto, influye positivamente en el aumento del tiempo de vida de útil del agua.

La capacidad de almacenamiento del disco es el factor determinante para establecer el tiempo máximo que el detector puede funcionar. Según el diseño este tiempo es de 18 meses. Se puede concluir que el WCD necesitará mantenimiento periódico solo para mantener limpios los paneles fotovoltaicos y controlar el estado general de las instalaciones.

Se deben utilizar discos de estado sólido para el almacenamiento de datos ya que los discos magnéticos son susceptibles de fallas a altitudes mayores de 3000 msnm [26].

Dado que el flujo de partículas aumenta con la altitud [20] se debe implementar un medio para discriminar las señales, es decir, implementar un sistema de *trigger* externo para lo que se pueden usar detectores de centelleo o RPCs (*Resisitive Plate Chambers*) colocados en lo alto y en el fondo del WCD que a más de adquirir datos generen una señal de *trigger* cuando un muón vertical (VEM) atraviese el detector.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo es fruto de la colaboración de los grupos de investigación de la Colaboración LAGO de la ESPOCH y la USFQ. Fue financiado por la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo ESPOCH mediante el proyecto "Implementación de un Observatorio de rayos cósmicos de altura en el volcán Chimborazo Fase 1: Diseño y construcción de un detector Cherenkov de agua", la Universidad San Francisco de Quito USFQ a través del fondo PoliGrant 17988/2022 y el proyecto LA-CoNGA physics financiado por la Unión Europea a través del programa Erasmus+ Capacity Building 2019.

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v15i2.3130



Se agradece a Jorge Fabara permitirnos el uso de sus herramientas de simulación de rendimiento de sistemas fotovoltaicos y a David Egas del departamento de Química de la USFQ por los análisis de agua.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener conflicto de intereses en relación a la publicación de este artículo.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Los autores contribuyeron en todas las etapas de elaboración del presente artículo.



REFERENCIAS

[1] Allard, D., Allekotte, I., Álvarez, C., Asorey, H., Barros, H., Bertou, X., Burgoa, O., Gómez Berisso, M., Martínez, O., Miranda Loza, P., Murrieta, T., Pérez, G., Rivera, H., Rovero, A., Saavedra, O., Salazar, H., Tello, J., Ticona Peralda, R., Velarde, A. y Villaseñor, L. (2008). Use of water-Cherenkov detectors to detect Gamma Ray Bursts at the Large Aperture GRB Observatory (LAGO). *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, *595*(1), 57–91. doi: https://doi.org/10.1016/j.nima.2008.07.041

[2] Favaro, M. y Bersten, M. (2019). Análisis de Supernovas Asociadas a estallidos de Radiación Gamma. *Repositorio Institucional CONICET*, 81–83. https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/187817

[3] Ajello, M., Arimoto, M., Axelsson, M., Baldini, L., Barbiellini, G., Bastieri, D., Bellazzini, R., Bhat, P. N., Bissaldi, E., Blandford, R. D., Bonino, R., Bonnell, J., Bottacini, E., Bregeon, J., Bruel, P., Buehler, R., Cameron, R. A., Caputo, R., Caraveo, P. A., … Zimmer, S. (2019). A Decade of Gamma-Ray Bursts Observed by Fermi-LAT: The Second GRB Catalog. *The Astrophysical Journal, 878*(1), 52. doi: https://doi.org.10.3847/1538-4357/ab1d4e

[4] Aglietta, M. et al. (1996). Search for gamma-ray bursts at photon energies E >= 10-GeV and E >= 80-TeV. *Astrophys. J., 469*, 305–310. doi: https://doi.org/10.1086/177779

[5] Bartoli, B., Bernardini, P., Bi, X. J., Cao, Z., Catalanotti, S., Chen, S. Z., Chen, T. L., Cui, S. W., Dai, B. Z., Dâ €™Amone, A., Danzengluobu, Mitri, I. D., Piazzoli, B. D., Girolamo, T. D., Sciascio, G. D., Feng, C. F., Feng, Z., Feng, Z., … Zhu, Q. Q. (2017). Search for Gamma-Ray Bursts with the ARGO-YBJ Detector in Shower Mode. *The Astrophysical Journal*, *842*(1), 31. doi: https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa74bc

[6] Collaboration, T. P. A. (2015). The Pierre Auger Cosmic Ray Observatory. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 798, 172–213. doi: https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.06

[7] Sidelnik, I. y Asorey, H. (2017). LAGO: The Latin American giant observatory. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 876, 173–175. doi: https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.02.069

[8] Sidelnik, I., Otiniano, L., Sarmiento-Cano, C., Sacahui, J., Asorey, H., Rubio-Montero, A. y Mayo-Garcia, R. (2023). The capability of water Cherenkov detectors arrays of the LAGO project to detect Gamma-Ray Burst and high energy astrophysics sources. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1056, 168576. doi: https://doi.org/10.1016/j.nima.2023.168576

[9] Sarmiento, C. A., Nuñez-Castiñeyra, L. A., Asorey, H., Núñez, L. A., Miranda, P. C., Salinas, C. A. y Ticona, R. (2016). *Analysis of Background Cosmic Ray Rate in the 2010-2012 Period from the LAGO-Chacaltaya Detectors.* https://pure.umsa.bo/es/publications/analysis-of-background-cosmic-ray-rate-in-the-2010-2012-period-fr

[10] Velarde, A., Ticona, R., Miranda, P., Rivera, H. y Quispe Quispe, J. (2009). LARGE APERTURE GAMMA RAY OBSERVATORY THE LAGO PROJECT IN BOLIVIA. *Revista Boliviana De Física, 15,* 32–38.

[11] Quishpe, R., Audelo, M., Calderón, M., Carrera, E., Cazar, D., Guerrero, D., Mantilla, C., Martínez, O., Vargas, S., Vasquez, N., Velasquez, C. (2015). Panchito Water Cherenkov Detector Water Studies for the LAGO Collaboration. *Nuclear and Particle Physics Proceedings*, 267-269, 433–435. doi: https://doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2015.10.144

[12] Dupont. (2004). *Dupont Tyvek User's Manual*. https://www.dupont.com/content/dam/dupont/amer/us/en/safety/public/documents/en/DuPont_Tyvek_Users_Guide.pdf

[13] The Engineering Toolbox. (2001). *Materials Light Reflecting Factors*. https://www.engineeringtoolbox.com/light-material-reflecting-factor-d_1842.html

[14] Asorey, H. (2012). *Los Detectores Cherenkov del Observatorio Pierre Auger y su Aplicación al Estudio de Fondos de Radiación* [Tesis P.h. D]. https://www.researchgate.net/publication/269700456_Los_Detectores_Cherenkov_del_Observatorio_Pierre_Auger_y_su_Aplicacion_al_Estudio_de_Fondos_de_Radiacion

[15] Tene, T. (2013). PROTOCOLO DE PURIFICACIÓN DE AGUA DEL TANQUE CHERENKOV DETECTOR DE PARTÍCULAS CÓSMICAS, 2–5. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/2629

[16] Arnaldi, L. H., Cazar, D., Audelo, M. y Sidelnik, I. (2020). The new data acquisition system of the LAGO Collaboration based on the Redpitaya board. *IEEE Xplore*, 87–92. doi: https://doi.org/10.1109/CAE48787.2020.9046374

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v15i2.3130



[17] Fabara, J. (2023). *Simulation and Economic Savings Study of Solar Renewable Systems for a House* [Tesis P.h. D].

[18] Proviento. (2016). *High-Temp Long Life GEL Deep Cycle Battery HTB12-100*. https://proviento.com.ec/baterias-solares/199-bateria-solar-de-gel-vida-util-prolongada-100ah12vdc.html

[19] Poole, C. M., Cornelius, I., Trapp, J. V. y Langton, C. M. (2012). A cad interface for geant4. *Australasian physical & engineering sciences in medicine, 35*, 329–334.

[20] Sarmiento-Cano, C., Suárez-Durán, M., Ardila, R. C., Vásquez Ramírez, A., Jaimes-Motta, A., Nuñez, L. A., Dasso, S., Sidelnik, I. y Asorey, H. (2022). The ARTI framework: cosmic rays atmospheric background simulations. *European Physical Journal C*, 82. doi: https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-022-10883-z

[21] MAGIC-Collaboration. (2019). Teraelectronvolt emission from the γ-ray burst GRB 190114C. *Nature, 575*(7783), 455–458. doi: https://doi.org/10.1038/s41586-019-1750-x

[22] Abdalla, H., Adam, R., Aharonian, F., Ait Benkhali, F., Angüner, E. O., Arakawa, M., Arcaro, C., Armand, C., Ashkar, H., Backes, M. et al. (2019). A very-high-energy component deep in the γ-ray burst afterglow. *Nature, 575*(7783), 464–467.

[23] Huang, Y., Hu, S., Chen, S., Zha, M., Liu, C., Yao, Z., Cao, Z. et al. (2022). LHAASO observed GRB 221009A with more than 5000 VHE photons up to around 18 TeV. *GRB Coordinates Network*, 32677, 1.

[24] Hamamatsu. (2019). *Large Photocatode area Photomultiplier Tube*. https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/etd/LARGE_AREA_PMT_TPMH1376E.pdf

[25] Cazar-Ramirez, D. (2023). Leopard Designs. https://github.com/DennisCazar/LeopardDesigns

[26] DELL Technologies. (2023). *Hard Drive Failures Caused by High Altitudes*. https://www.dell.com/support/kbdoc/en-us/000146135/hard-drive-failures-caused-by-high-altitudes